

助燃剂对木垛火燃烧特性影响研究

张小芹, 宗若雯, 方廷勇, 王荣辉, 廖光焯
(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 采用木垛火作为火源, 比较添加与未添加助燃剂两种情况下其燃烧特性, 研究助燃剂对可燃物燃烧特性的影响。实验在符合 ISO 9705 标准的 ISO ROOM 装置中进行, 测量包括热释放速率、质量损失速率、房间内温度场、烟气中组分的质量分数等多个物性参数。同时对该过程进行了计算机数值模拟, 其结果与实验结果符合较好。

[关键词] 木垛; 助燃剂; 全尺寸; 燃烧特性; 数值模拟

[中图分类号] X928.7 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742 (2007) 02-0090-08

1 前言

纵火案往往造成生命和财产的严重损失。1994年, 据美国国家防火协会统计, 美国每年火灾造成的损失达到6亿美元, 其中20%的火灾是由于纵火导致的, 每年约107 800起纵火案被报道, 550人丧生^[1]。汽油、柴油、油漆等系列石油类助燃剂, 由于其廉价性而且容易获得, 被纵火者广泛采用。

可燃物燃烧的热释放速率对火灾过程中其他参数的发展具有决定性的影响, 因此, 对火灾科学的试验研究而言, 确定一种稳定、复现性较好的标准火源具有重要意义。木垛是由固定截面积的本棒交叉排列堆成的垛体结构。木垛火具有很好的复现性, 在目前许多火灾实验中也经常采用木垛作为火源, 有的研究机构还将其作为一种火灾试验的标准火源^[2,3]。

从国内外发表的文献来看, 对纵火案的研究主要集中于各类助燃剂的痕量检测以及研究更好的检测方法方面, 而采用全尺寸实验模拟的方法, 来研究助燃剂对可燃物燃烧特性的影响则较为鲜见^[4~8]。

基于上述事实, 作者采用木垛火作为火源, 研

究添加与不添加助燃剂两种情况下各自的燃烧特性。通过比较其燃烧特性的不同, 研究助燃剂对可燃物燃烧特性的影响, 为纵火案的调查提供一定的理论基础。实验在符合 ISO 9705 标准的 ISO ROOM 装置中进行, 测量其物性参数, 同时对该过程进行了计算机数值模拟, 数值模拟的结果与实验结果符合较好。

2 实验及数值模拟方法

2.1 实验装置

图1是 ISO ROOM 主体实验装置示意图, 它是按照 ISO 9705 标准建造的全尺寸标准燃烧间^[9], 内尺寸为 3.6 m×2.4 m×2.4 m, 墙的四周和顶棚都由砖混结构组成, 内衬 15 mm 厚的耐火石棉板, 门尺寸(高×宽)为 2.0 m×0.8 m, 位于北墙的中央, 目的是使集烟罩能够收集房间内的燃烧产物。集烟罩开口尺寸为 3 m×3 m×1 m, 位于标准燃烧间的外部, 它的上方与排烟管道相连接。排烟管道的内径为 400 mm, 管长 4.8 m。测量段在排烟管道后半段, 装有气体采样设备和激光设备。气体采样设备与 Servomex 气体分析仪连接, 测量烟气中的 O₂, CO₂ 和 CO 的质量分数。在排烟管道的末端装

有风机，通过变频器调节排烟管道内的气体流量。采用 Agilent 34970A 数据采集卡对实验过程进行实时数据采集，采集时间间隔为 5 s。

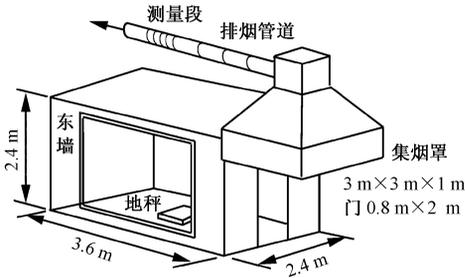


图 1 主体实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of ISO 9705 room

标准单室地面的几何中心处放 ThermoNobel 电子秤，以测量燃料在燃烧过程中的动态质量损失。为了保护电子秤，在木垛与电子秤之间放置 1 m × 1 m 的石膏板。

为了测量房间内温度场，在相应的位置布置了一定数量的 K 型热电偶。图 2 中所示是布置在房间顶棚的热电偶。共有 5 个 K 型热电偶安装在顶棚上，一个直接安装在顶棚的正中央，其余 4 个有规则地安装在中央热电偶的周围，测量顶棚烟气层温度。在房间的西南墙角处装有一棵热电偶树，由 7 个 K 型热电偶组成，如图 3 所示，测量房间内沿着垂直方向上的温度变化。

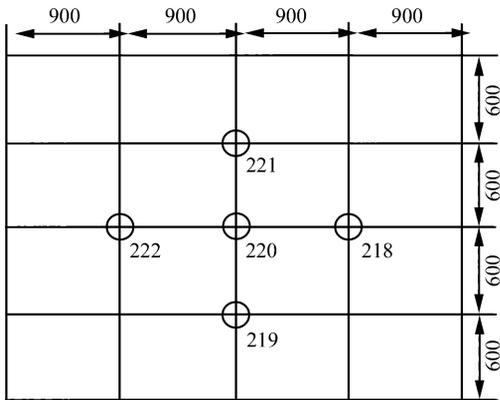


图 2 房间内顶棚热电偶平面布置

Fig.2 Disposition of thermocouples on roof

2.2 实验方法

实验采用的木垛是由截面积为 2.5 cm × 3.0 cm，长为 20 cm 的木棒交叉排列堆成，每层 5 根，均匀排列，每层高 3 cm，共 16 层。木棒的材料为杉木。为保证木材的干湿程度近似一致，将所有的

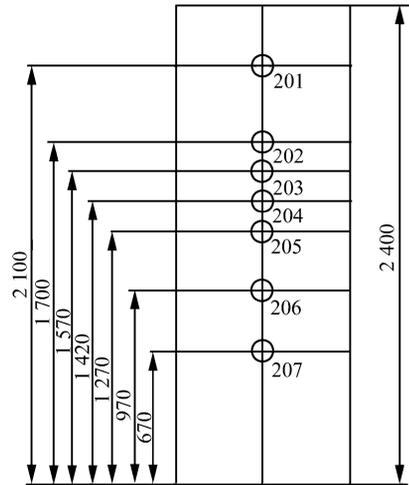


图 3 墙角处热电偶树垂直方向布置

Fig.3 Disposition of thermocouples at the corner

木垛在试验房间内放置约 1 个月的时间。助燃剂采用市售 90# 汽油，闭口闪点 -43 °C，开口闪点 133 °C，燃点 164 °C，燃烧热 46.8 MJ/kg。每次实验添加的汽油量大约是 1 L。

试验时，不添加汽油木垛由一小盘质量约 10 g 的无水酒精从木垛底部点燃，加汽油木垛直接点燃。实验环境温度 23 °C，湿度 22.8 %，实验过程中保持排烟管道中气体流量稳定在 2.5 m³/s。

采用火灾动力学模拟软件^[10] FDS (Fire Dynamics Simulat-Or, ver.3.0)，对实验过程进行数值模拟。

3 实验结果及分析

3.1 质量损失及质量损失速率

图 4 是质量损失曲线。木垛不加汽油时，前 400 s 内，木垛质量损失速率持续增大；400 s 到 1 100 s，保持平稳燃烧状态；随后减缓，直至被水扑灭。木垛加汽油时，300 s 内，木垛质量损失迅速，消耗的主要是汽油；300 s 到 500 s，质量损失缓慢；500 s ~ 1 200 s，木垛平稳燃烧，消耗的主要是木材；1 200 s 时，用水将火扑灭。

3.2 热释放速率

热释放速率 (HRR) 是评价火灾危险性的重要参数，也是进行火灾模拟研究的基础参数。该实验采用氧耗原理^[11,12] 测量热释放速率，结果见图 5。木垛不加汽油时，在前 400 s 内，木垛热释放速率增长缓慢；随后的 200 s 内木垛热释放速率迅速增加至最大值 55 kW；600 s 到 1 150 s，保持平稳燃烧

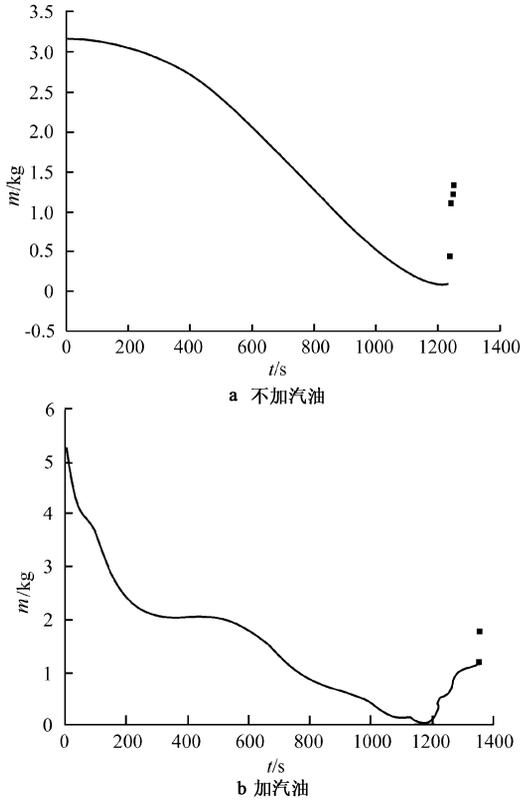


图 4 木垛质量损失曲线

Fig.4 Mass loss curve of wood crib

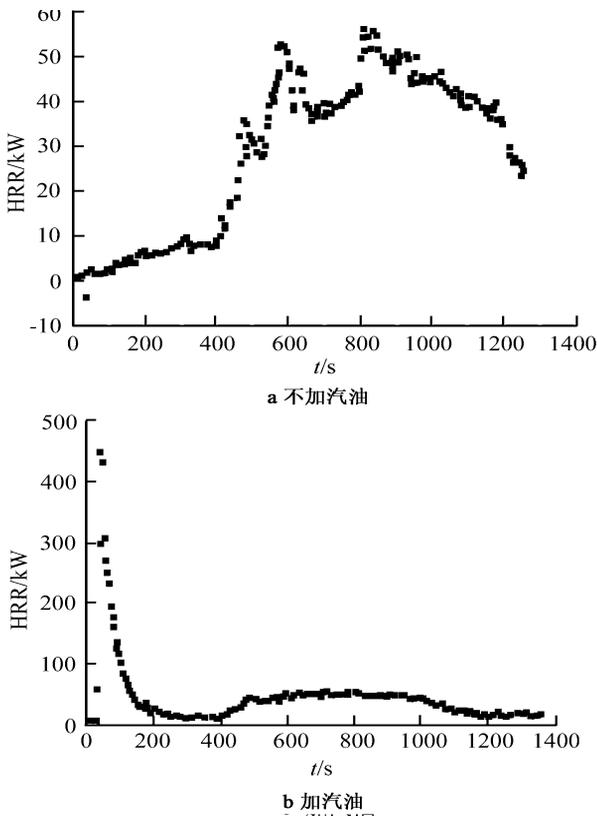


图 5 木垛热释放速率曲线

Fig.5 Heat release rate of wood crib

状态；随后减缓，直至被水扑灭。木垛加汽油时，一旦点燃，木垛热释放速率急剧升高，达到 450 kW，接着迅速下降。当木垛内汽油消耗掉后，热释放速率恢复到不加汽油时的原始情形，将第二次达到峰值，约为 52 kW（见图 6）。

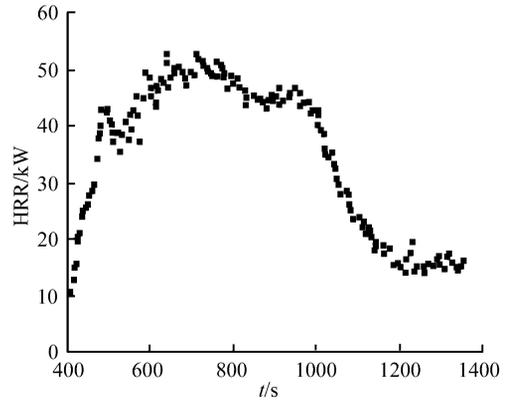


图 6 木垛加汽油时 400 s 后的热释放速率曲线

Fig.6 Heat release rate curve of wood crib when gasoline is added

3.3 室内温度场

图 7 为房间顶棚的温度曲线。木垛不加汽油时，在前 400 s 内，温度增加缓慢；随后的 200 s 内

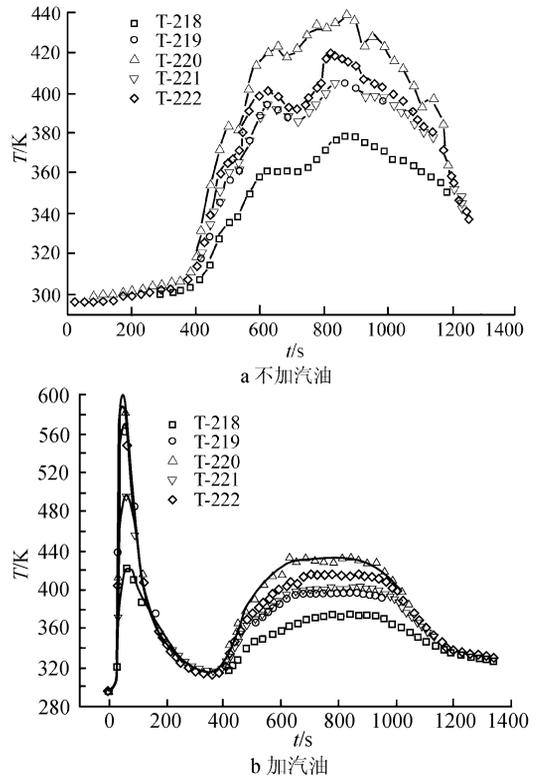


图 7 房间顶棚温度曲线

Fig.7 Temperature curve on roof

温度迅速增加；600 s~1 150 s，温度保持稳定，最高达到 440 K。木垛加汽油时，着火后，房顶温度急剧升高，瞬间达到 590 K 以上，接着迅速下降，随后恢复到木垛不加汽油时的温升状态。800 s 时达到第二次峰值，约 440 K。

图 8 是墙角垂直方向温度曲线。其变化趋势与房顶温度类似。

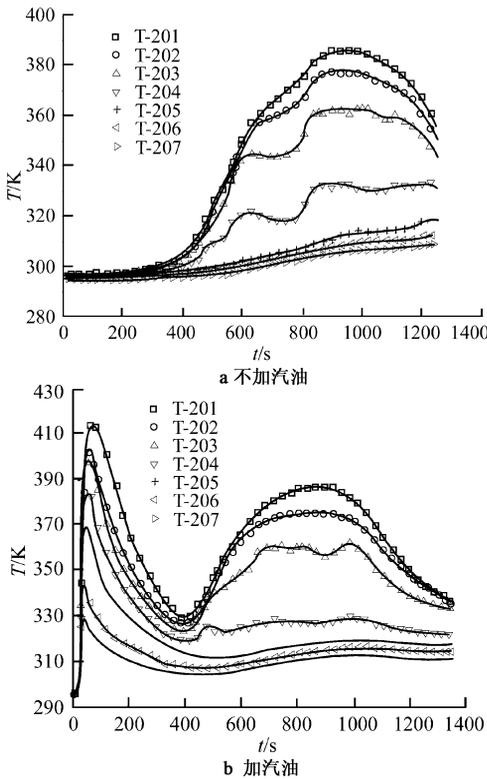


图 8 墙角垂直方向温度曲线
Fig.8 Temperature curve at corner

3.4 组分浓度

图 9~图 11 是烟气中氧气、二氧化碳和一氧化碳质量分数的变化曲线。产物 CO₂ 和 CO 浓度随时间的变化趋势跟其对应的热释放速率的变化趋势一致，而反应物 O₂ 却恰好相反。不加汽油时，CO 的质量分数最高达到 100×10⁻⁶。加汽油时，CO 质量分数 2 个峰值，第一个峰值主要是由于汽油燃烧引起，可达 230×10⁻⁶，第二个峰值是在汽油耗完后，木材燃烧所引起，最高达到约 100×10⁻⁶，与不加汽油的情况较接近。

4 数值模拟结果及分析

4.1 参数设定

火源热释放速率的合理设定是进行火灾数值研

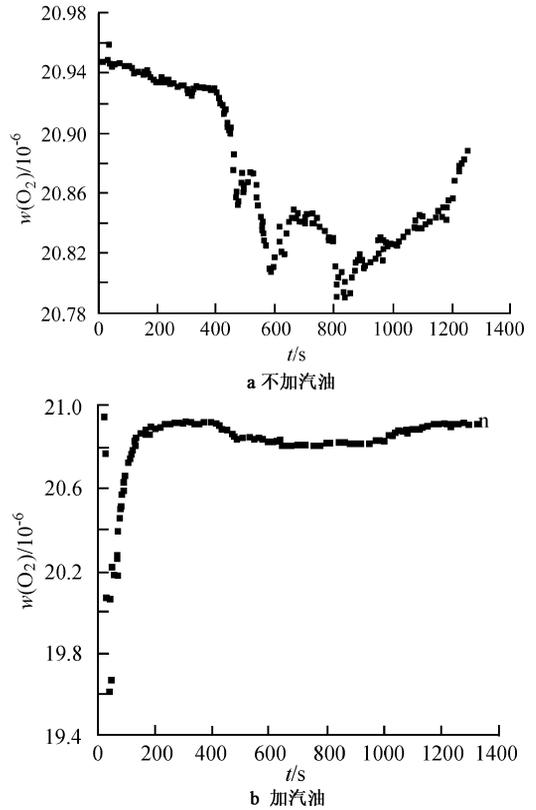


图 9 氧气质量分数曲线
Fig.9 Oxygen mass fraction

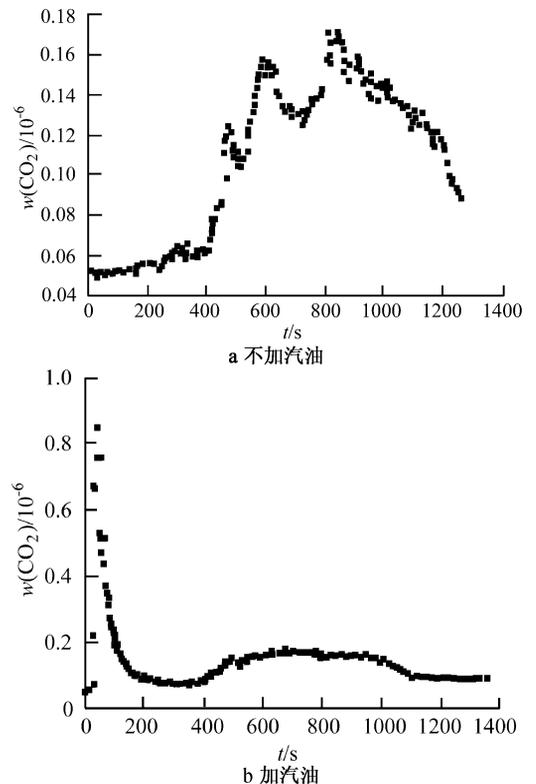


图 10 二氧化碳质量分数曲线
Fig.10 Carbon dioxide mass fraction

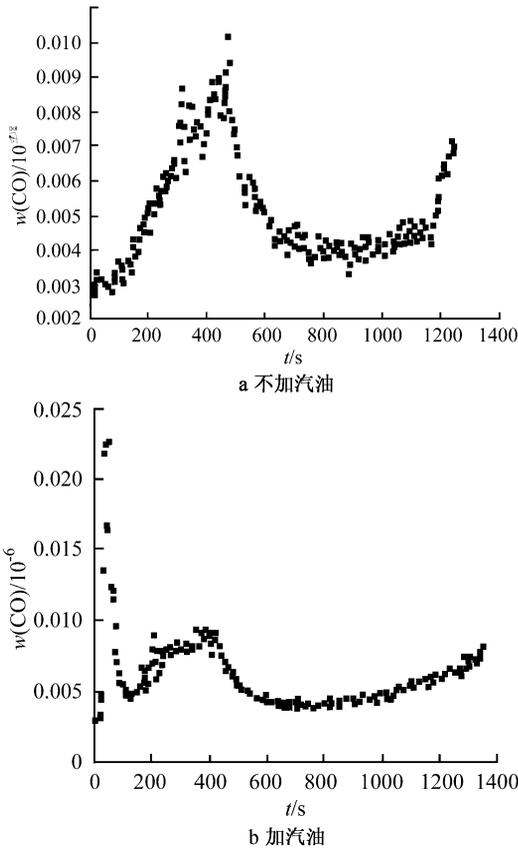


图 11 一氧化碳质量分数曲线
Fig.11 Carbon monoxide mass fraction

究的基础。作者在实验的前提下，依照热释放速率的实验测量结果，在 FDS 的参数设定过程中进行了很详细的自定义设定，图 12 即计算输入的热释放速率曲线。不难看到，它跟实验的测量结果（图 5）非常相近，这就为数值计算的准确性打下了坚实的基础。

计算中壁面采用石膏板，环境温度设为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，以跟实验时的情况保持一致。反应物选取木材，其反应参数根据 Kashiwagi^[13] 的文章设定。房间尺寸的设置完全依据 ISO ROOM 的标准，计算网格采用 $36 \times 24 \times 24$ 。

4.2 计算结果及分析

实验中由于火焰会不断跳动，这将使得火源某固定点温度的测量产生较大误差，故实验过程中没有采集火源温度的数据。图 13 是计算得到的火源垂直中心处温度随时间的变化曲线，图中 z 为垂直高度。其变化趋势跟各自的热释放速率保持一致。随着高度的增加，火源垂直中心温度下降。从图中看到， $z=0.4\text{ m}$ 处温度明显高于其他各点，可以

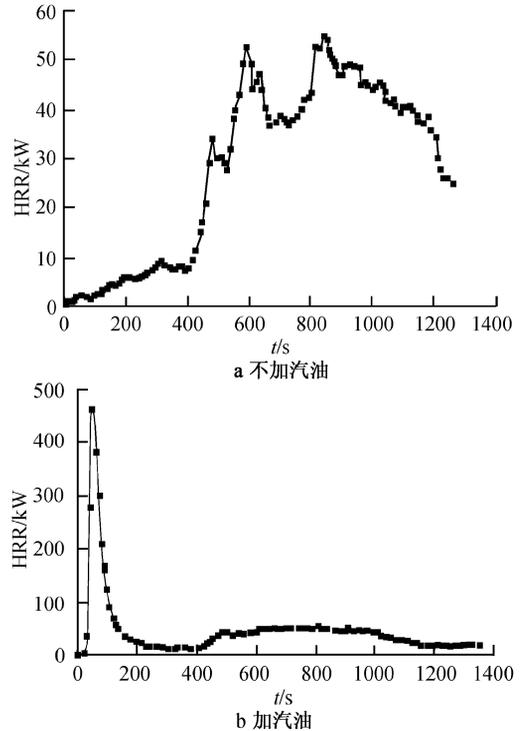


图 12 计算输入的热释放速率曲线
Fig.12 Heat release rate for simulation

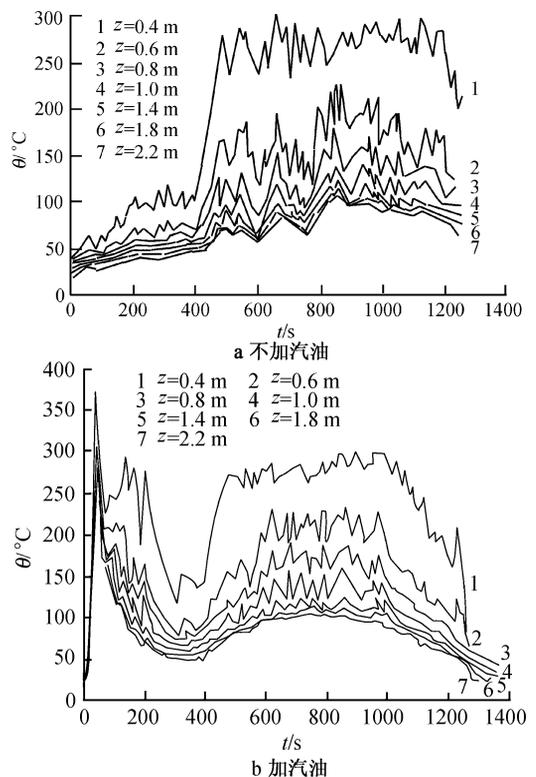


图 13 火源垂直中心线温度
Fig.13 Temperature curve at vertical middle of fire source

判断该点处于有焰区。

图 14 为计算得到的房间顶棚温度随时间变化的情况，每条曲线对应于图 2 所示各实验测量点。两图曲线走向均与实验结果（图 7）一致。不加汽油时，计算得顶棚最高温度值 405 K，这与实验测得最大值 440 K 接近。加汽油时，着火后房顶温度瞬时上升至 750 K 以上，随后下降，随着木材开始燃烧，温度再次上升到一个峰值约 400 K。计算值与实验测量值有一定差距，可能主要有以下两方面原因：一是实验过程中测量仪器有一定误差；二是 FDS 计算中，采用的反应物模型并不完全符合该实验的实际情况，导致计算结果有偏差。

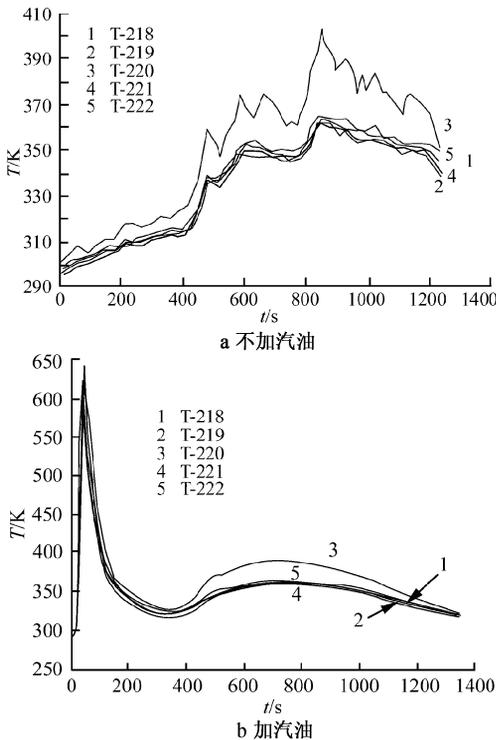


图 14 房间顶棚温度曲线
Fig.14 Temperature curve on roof

图 15 是计算得到的房顶中心处热流密度随时间变化的情况。其变化趋势与各自热释放速率相似。不加汽油时，房间顶棚中心处热流密度最高可达 0.9 kW/m^2 ，而加汽油时，房间顶棚中心处热流密度最高可达 23.0 kW/m^2 以上。

图 16 是计算得到的墙角处垂直方向温度随时间变化的情况，每条曲线对应于图 3 所示各实验测量点。两图中，最下端两个计算点的温度变化均不大，接近室温，这与实验结果一致。

为了更好的观察烟气层的厚度，作者计算了

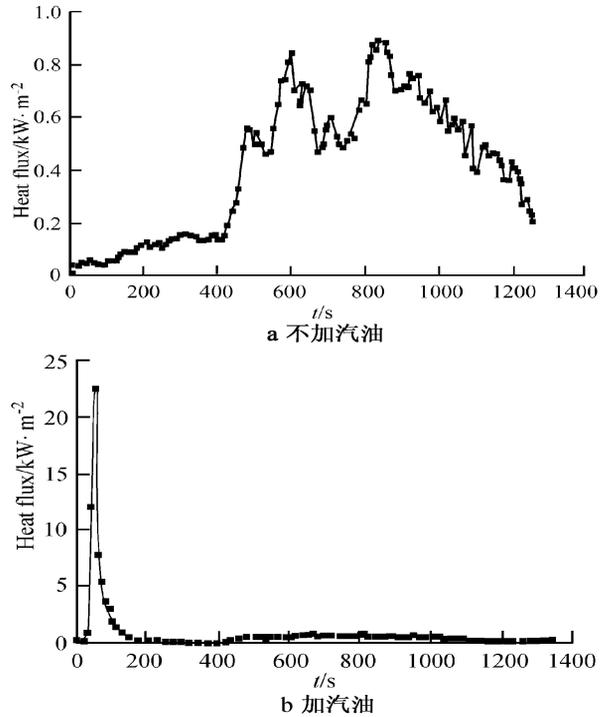


图 15 房间顶棚中心处热流密度曲线
Fig.15 Heat flux in the middle of roof

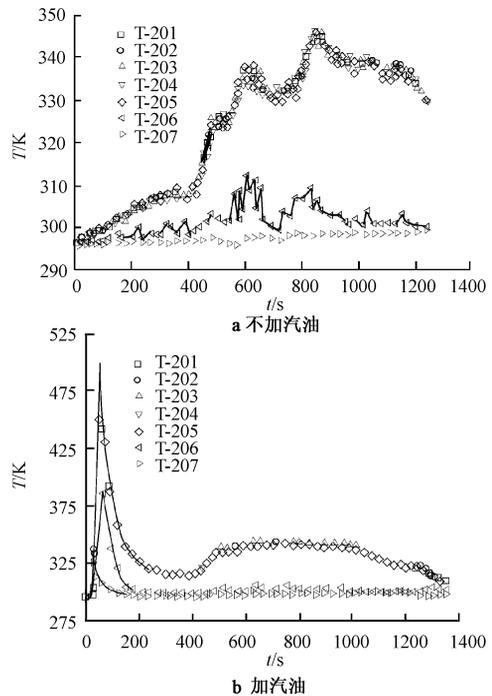


图 16 墙角处垂直方向温度曲线
Fig.16 Temperature curve at corner

门口中心垂直方向上，不同高度处温度及气流法向速度随时间的变化情况，分别如图 17 和 18 所示。比较木垛不加汽油和加汽油两种情况下，门口中心

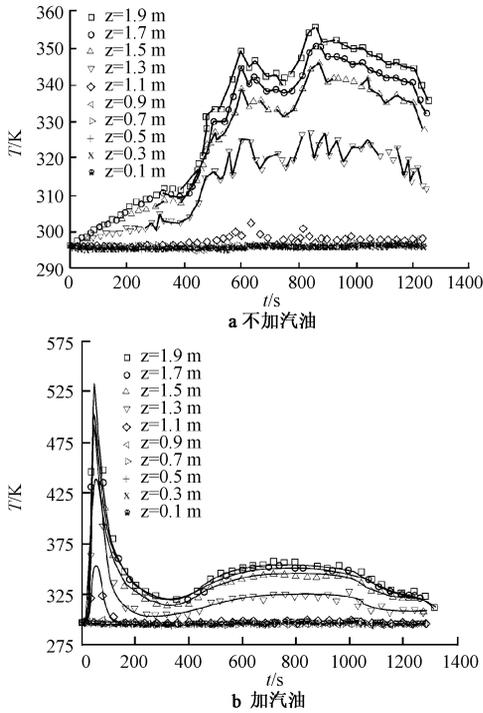


图 17 门口中心处垂直方向温度曲线
Fig.17 Temperature curve at vertical middle of door

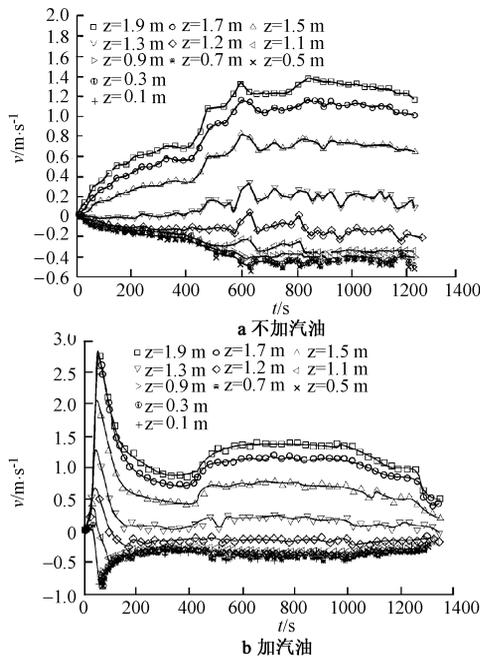


图 18 门口中心不同高度位置法向温度曲线
Fig.18 Normal velocity curve at vertical middle of door

下, 烟气温度基本保持室温, 1.5 m 以上, 烟气温度均较高, 而 1.3 m 的位置, 烟气温度则居中。由此可判断燃烧过程中的中性面高度约为 1.3 m。从图 18 中看到, 高度 1.2 m 以下, 烟气速度为负值, 室外的空气流入室内, 1.5 m 以上, 烟气速度为正, 烟气流到室外, 而 1.3 m 的位置, 气流速度接近零。这样, 很清楚地看到, 燃烧过程中的中性面高度约为 1.3m。

5 结论

1) 在添加助燃剂的木垛的燃烧过程中, 将首先消耗掉木材中的助燃剂, 无论是热释放速率、温度场还是产物的浓度都将会出现一个较大的峰值, 接着将恢复到未添加助燃剂的木垛的燃烧状况, 随着燃烧过程的进行, 这些参量将出现第二个相对较小的峰值。

2) 实验测得的质量损失速率、各点温度以及一氧化碳浓度变化曲线均与热释放速率曲线的变化趋势保持一致。发展各种火灾参数之间的定量关系, 例如用木垛的热释放速率预测其它火灾动力学参数, 将是下一步的重要研究内容。

3) 针对不同的火灾可燃物, 研究者需进行大量的实验研究, 优化 FDS 中的反应数据库, 以使模拟结果更加可靠。

4) 数值模拟的结果与实验结果具有较好的一致性, 这显示了 FDS 在火灾动力学计算方面的强大优势。

参考文献

- [1] NFPA. Annual Arson Report [R]. US National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1994
- [2] 霍然, 胡源, 李元洲. 建筑火灾安全工程导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- [3] NFPA. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [M]. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 1995
- [4] Almirall J R, Furton K G. Characterization of background and pyrolysis products that may interfere with the forensic analysis of fire debris [J]. Anal Appl Pyrolysis, 2004, 71 (1): 51~67
- [5] Touron P, Malaquin P, Gardebas D, Nicolay J. Semi-automatic analysis of fire debris [J]. Forensic Science International, 2000, 110 (1): 7~18

处垂直方向上温度与法向速度随高度的变化趋势, 它们具有相似性。从图 17 中看到, 高度 1.1 m 以

- [6] Tan Beijing, Hardy J K, Snavely R E. Accelerant classification by gas chromatography/mass spectrometry and multivariate pattern recognition [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, 422 (1): 37~46
- [7] McCurdy R J, Atwell T, Cole M D. The use of vapour phase ultra-violet spectroscopy for the analysis of arson accelerants in fire scene debris [J]. *Forensic Science International*, 2001, 123 (2—3): 191~201
- [8] Sandercock P M L, Pasquier E. D. Chemical fingerprinting of unevaporated automotive gasoline samples [J]. *Forensic Science International*, 2003, 134 (1): 1~10
- [9] ISO 9705. Fire Tests-Full Scale Room Test for Surface Products [S]. Geneva: International Standards Organization (ISO), 1993
- [10] McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 3) [R]. (In) Technical Reference Guide. 2002 Edition. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2002. Technical Report NISTIR 6783
- [11] Huggett C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen Consumption measurements [J]. *Fire and Materials*, 1980, 4(2): 61~65
- [12] Babrauskas V, Grayson S J. Heat Release in Fires [M]. Elsevier Applied Science London and New York; Library of Congress Catalogue-in-Publication Data, 1992
- [13] Ritchie S J, Steckler K D, Hamins A, et al. The Effect of Sample Size on the Heat Release Rate of Charring Materials [A]. In Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science [C]. International Association For Fire Safety Science, 1996. 177~188

Accelerant Influence on Combustion Characteristics of Wood Crib Fire

Zhang Xiaoqin, Zong Ruowen, Fang Tingyong, Wang Ronghui, Liao Guangxuan

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] Combustion characteristics of wood crib fire under two different conditions, i. e. accelerant added and not added, was studied to investigate the accelerant effect on combustion characteristics of combustible materials. The experiments were carried out in a full-scale room in accordance with ISO 9705, where multi-parameters were measured, such as heat release rate, mass loss rate, temperature field and species concentration. At the same time, this process was numerically simulated. The computational results were consistent with experiment data.

[Key words] wood crib; accelerant; full-scale; combustion characteristics; numerical simulation